



Н.Б. Парамонов, Г.А. Егоров, С.В. Семенихин

ПРЕДПРОЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ «ЭЛЬБРУС»

Аннотация

Рассмотрены подходы к моделированию сложных систем управления с целью обоснования облика систем и испытаний. Предложен метод оценки функции влияния отдельных компонентов на результаты работы системы. На примере робототехнических комплексов показана возможность применения единой программно-аппаратной платформы «Эльбрус» как на этапе предпроектного анализа, так и при проведении соответствующих ОКР.

Ключевые слова: робототехнические комплексы, системы управления, вычислительные средства.

Введение

Важной тенденцией развития наземной робототехники является постепенный переход от дистанционно-управляемых к полуавтономным, а в перспективе – к автономным робототехническим комплексам.

Необходимым этапом создания робототехнических комплексов (РТК) является предпроектное моделирование, направленное на обоснование и выбор основных технических решений. Одним из важнейших направлений исследований по созданию систем управления РТК становится моделирование, обеспечивающее разработку методов, алгоритмов и аппаратно-программных средств. Моделирование на вычислительных средствах, используемых в дальнейшем как программно-аппаратная платформа РТК, позволяет дать оценку реализуемости ОКР уже на предпроектной стадии разработки. Отечественные вычислительные средства, применяемые в РТК, позволяют решать вопросы импортозамещения и информационной безопасности.

Моделирование системы управления РТК

Для проведения предпроектного анализа сложных систем управления требуется большой объем моделирования. Математическая модель сложной системы создается на принципах функционального объединения моделей элементов и подсистем в единый комплекс программно реа-

лизованных алгоритмов, осуществляющих имитацию процессов для всего многообразия входных условий и текущих состояний реальной системы [1]. Для подобных моделей процессы взаимодействия частных моделей являются нетривиальной задачей. Особенно важно учитывать влияние ошибок или неточностей, которые были допущены при разработке моделей элементов и подсистем [2].

Факторы влияния ошибок моделирования отдельных элементов на адекватность модели в целом получаются чрезвычайно сложными, и уверенности в том, что они в совокупности не приведут к значительным ошибкам расчета показателей эффективности системы, нет. Это происходит из-за того, что распределение требований к точности описания элементов, которое было осуществлено на этапе выбора их моделирующих алгоритмов, хотя и является весомой гарантией отсутствия значительных промахов при разработке рабочего моделирующего алгоритма системы, все же не снимает вопросов, связанных с комплексной оценкой точности спроектированной модели. Это особенно важно учитывать на стадии предпроектного моделирования, когда риск необоснованных решений особенно велик, а алгоритмы модели зачастую носят описательный характер.

Частично снимает вопрос достоверности результатов предварительный выбор используемых вычислительных средств. В ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука» в качестве основного направле-

ния внедрения вычислительных средств выбрана программно-аппаратная платформа «Эльбрус» [3] как на этапах ОКР, так и на этапах предпроектного анализа. Использование этой платформы на этапах предпроектного анализа систем управления позволяет на ранних стадиях дать оценку вычислительной сложности алгоритмов управления и оценить реализуемость соответствующих технических решений.

Будем считать, что комплекс моделирующих программ состоит из совокупности программных компонентов и удовлетворяет следующим требованиям, характеризующим моделирующий комплекс как сложную систему:

- моделирующая система может быть расчленена (необязательно единственным образом) на конечное число частей, называемых подсистемами; каждая подсистема, в свою очередь, может быть расчленена на конечное число более мелких подсистем и т. д., вплоть до получения в результате конечного числа шагов – таких частей, называемых элементами сложной системы, относительно которых имеется договоренность, что в условиях данной задачи они не подлежат дальнейшему расчленению на части;
- элементы сложной системы функционируют не изолированно друг от друга, а во взаимодействии, при котором свойства одного элемента зависят от условий, определяемых поведением других элементов;
- свойства сложной системы в целом определяются не только свойствами элементов, но и характером взаимодействия между элементами.

Например, для системы управления движением мобильного робота требуется формировать локальные карты проходимости, полученные с помощью различных сенсорных систем. Карта суммарной проходимости, используемая для поиска траектории движения в целевую точку, стро-

ится путем объединения локальных карт, полученных в различных точках рабочей зоны, и путем их совмещения с учетом перемещения робота (данных системы навигации).

Карта суммарной проходимости имеет несколько слоев (рис. 1), каждый из которых обновляется по данным определенной сенсорной системы (камеры – слой опорной проходимости, 3D-лидара – слой профильной проходимости) в отдельном потоке, что позволяет распределять вычислительную нагрузку по нескольким ядрам процессора.

Определение проходимости для каждого положения робота, необходимое для вычисления траектории движения в целевую точку, осуществляется путем вычисления максимального значения проходимости по всем слоям карты по всем клеткам, находящимся в границах проекции робота на горизонтальную плоскость. Обработка данных для этих карт – достаточно непростой процесс, оценка вычислительной сложности которого является нетривиальной задачей. Использование однотипных вычислителей как на этапе предпроектного моделирования, так и в ходе выполнения ОКР позволяет дать более полную оценку требуемых вычислительных ресурсов и качества решения всей задачи планирования.

Рассмотрение моделирующих программ на этапе предпроектных исследований позволяет опереться на математический аппарат системного анализа. Для того чтобы задать комплекс моделирующих программ как систему, необходимо и достаточно задать описание всех входящих в нее элементов и описать взаимодействие между элементами. Элементами описываемой системы являются программные моделирующие компоненты. Элементы в общем случае могут представлять задание агрегата (в агрегативной модели динамической системы) в виде его программной реализации в соответствующей вычислительной среде.

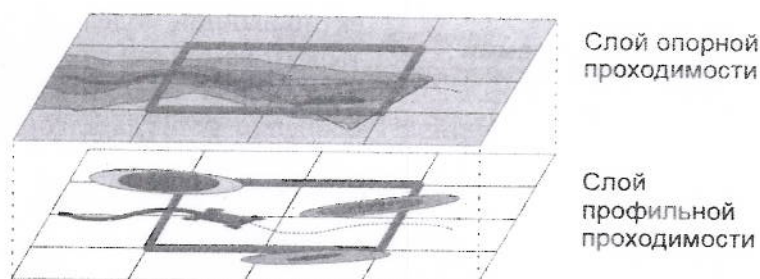


Рис. 1. Многослойная карта проходимости робототехнического комплекса

Связи между компонентами должны удовлетворять требованиям, обусловленным информационными потоками в комплексе моделирующих программ, описывающих соответствующие состояния информационной системы. Такой метод описания моделирующих программ предпроектного анализа информационных систем позволяет опереться на формальный аппарат алгоритмических алгебр В.М. Глушкова.

Отличие описываемой системы задания взаимодействующих компонентов через функции предиката на непустом множестве от традиционных методов описания моделирующих программ состоит в том, что:

- не накладываются ограничения на полное задание логической функции предиката (частичная определенность);
- существует возможность задания множества логических функций, адекватно описывающих отображение $P^n: A^n\{u, l\}$ – многоверсионное задание предиката.

Моделью будем называть систему, состоящую из множества A и определенной на данном множестве совокупности предикатов:

$$П = \{p_s^n \mid s = 1, 2, \dots\}.$$

Множество A будем называть основным множеством данной модели, предикаты, принадлежащие к $П$, – ее основными предикатами. Последовательность n_1, n_2, \dots, n_s будем называть типом модели, а $П = \{p_s^n \mid s = 1, 2, \dots\}$ – сигнатурой.

Модель $M_{A1} = \langle A; П \rangle$, где $A1$ – непустое подмножество A ; $p1^n \in П$ – предикат на множестве $A1$, индуцированный предикатом $p1^n \in П$, будем называть его подмоделью модели $M_{A=} \langle A; П \rangle$.

Множество однотипных подмоделей образуют класс моделей по данному типу. Учет возможности проведения классификации подмоделей по данному типу (по допустимой последовательности применения различных отношений на A) позволяет определять границы применимости разрабатываемых методов создания и компонентов моделирующих программ и ограничиваться рассмотрением комплексов моделей одного класса. В рамках однотипных классов моделей может быть рассмотрен вопрос об отношениях между моделями.

Однотипные модели $M_{A=} \langle A; П \rangle$ и $M_{B=} \langle B; П \rangle$, где $П = \{p_s^n \mid s = 1, 2, \dots\}$ и $П \Pi = \{q_s^n \mid s = 1, 2, \dots\}$, будем называть изоморфными, если существует взаимно-однозначное отображение G множества A

на множество B такое, что для любого $s = 1, 2, \dots$ предикат $p_s^n(a_1, a_2, a_3, \dots, a_{n_s})$ справедлив тогда и только тогда, когда выполняется предикат $q_s^n((a_1)G, (a_2)G, \dots, (a_{n_s})G)$ для произвольных $(a_1, a_2, a_3, \dots, a_{n_s}) \in A$. Отображение G в этом случае соответствует изоморфизмам $M_{A=} \langle A; П \rangle$ и $M_{B=} \langle B; П \Pi \rangle$.

Для моделирующих программ сложных информационных систем наличие изоморфных подмоделей соответствует режиму избыточности и возможности переиспользования соответствующих фрагментов. Построение модели на основе версий компонентов сводится к формированию цепочек преобразований.

Построение функциональных отношений для взаимодействующих компонентов моделирующих программ производится в процессе синтеза программы. Порождаемая программа может быть рассмотрена как расширяемое множество компонентов, исходное множество которых определяется множеством начальных конструкций языка программирования. Цепочки операторов над исходным множеством элементов формируют расширяемое множество компонентов с их частично определенными функциональными отображениями.

В ходе проведения моделирования встает вопрос об оценке функции чувствительности целевых функций поведения систем управления к отдельным факторам (множеству факторов). Требование системного подхода к необходимости вывода свойств и целей системы из свойств и целей ее элементов вызывает потребность построения системных целевых функций, чувствительных к свойствам элементов системы [4].

Применение методов единой программно-аппаратной платформы (в частности «Эльбрус») как на этапе предпроектного анализа, так и при дальнейших разработках позволяет использовать единую функцию цели системы управления.

Обозначим функцию цели – y . Будем считать, что абсолютная функция чувствительности цели к изменению параметра x_i системы равна соответствующей частной производной $S_i = \partial y / \partial x_i$; частное отклонение $\Delta y_i = S_i \Delta x_i$ и полное отклонение

$$\Delta y = \sum_{i=1}^N S_i \Delta x_i,$$

где N – число рассматриваемых элементов в системе (подсистеме, уровне).

Функции чувствительности и отклонения во временной области (в динамических системах) соответственно запишутся в следующем виде:

$$S_i(t) = \frac{\partial y(t)}{\partial x_i}; \quad \Delta y_i(t) = S_i(t) \Delta x_i;$$

$$\Delta y(t) = \sum_{i=1}^N S_i(t) \Delta x_i.$$

В приведенных соотношениях присутствуют производные только первого порядка. В ряде случаев эта аппроксимация недостаточна и необходимо учитывать последующие члены ряда Тейлора, используя, в частности, для представления функций чувствительности вторые производные:

$$S_{ij} = \frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j}.$$

Естественно, что вычисление и использование в различных приложениях таких функций чувствительности и отклонений второго порядка является задачей повышенной сложности.

Рассмотренные функции чувствительности широко используются при параметрическом анализе и синтезе систем. Для вычисления допусков на отклонения параметров элементов по заданному отклонению функции цели

$$\Delta y = \sum_{i=1}^N S_i \Delta x_i$$

можно использовать различные методы: расчет наихудшего случая, статистический расчет, смешанный расчет, методы динамики средних (аналоговых моделей), метод Монте-Карло и др.

При расчете наихудшего случая

$$\Delta y \leq \varepsilon = \sum_{i=1}^N |S_i| |\Delta x_i| = \sum_{i=1}^N |S_i| dx_i,$$

где ε – предельное допустимое отклонение (допуск); dx_i – максимальное изменение элемента x_i .

При статистическом расчете частные отклонения $\Delta x_i \in N(m_i, \sigma_i^2)$ рассматриваются как случайные переменные, имеющие, чаще всего, в соответствии с теорией ошибок, нормальную плотность распределения. Естественно, что статистический расчет имеет менее жесткие требования к абсолютному допуску.

При смешанном расчете одна группа элементов (изменяющихся детерминированно) рассчитывается по наихудшему случаю, а другая (с раз-

бросом элементов около номинальных значений) – статистически.

Зная величину функции чувствительности, можно решить задачу включения параметров в состав оцениваемых. Естественно, что преимущество следует отдать оценкам тех параметров x_j , для которых функции влияния на некоторый показатель Q качества принимают максимальные значения:

$$(j)^* = \max_j \frac{\partial Q}{\partial x_j} \delta x_j, \quad j = 1, \dots, k,$$

где δx_j – априорное предельное значение возмущения.

При существенной коррелированности частных производных оцениваемые параметры объединяют в группы. Часто решение этой задачи связывается с решением экстремальной задачи с ограничениями (как при заданной функции цели, так и при получении ее экстремального значения).

Рассмотрим наиболее распространенный случай предпроектного анализа, когда на развитие каждого j -уровня системы выделяются ограниченные средства – C и требуется их наилучшее использование – оптимальное распределение в пространстве составляющих элементов. При этом функция цены должна зависеть не только от номера элемента, но и от уровня (значения) параметра, его определяющего. Такой характер функционала затрат в наибольшей степени отвечает по принципу возрастания затрат по мере возрастания характеризующего элемент свойства, а сведение этого свойства до уровня максимального значения было бы практически невозможным (потребовались бы бесконечные ресурсы). При этом появляется возможность найти оптимальное распределение свойств элементов некоторого уровня иерархии системы, когда в максимальной степени реализуются цели системы на данном уровне.

Приведенный подход использовался в ходе обоснования облика системы управления мобильной информационной системы реального времени на программно-аппаратной платформе «Эльбрус» [4].

В табл. 1 приведены созданные и перспективные микропроцессоры ряда «Эльбрус», используя которые можно предложить технические решения, позволяющие применять их в качестве платформы для реализации систем управления робототехническими комплексами.

Применение общесистемного программного обеспечения (ОПО) «Эльбрус» позволяет обеспечить создание доверенной программно-аппаратной среды для бортовых вычислительных средств робототехнических комплексов.

Предпроектное моделирование показало, что если исходить из требований обработки 10 кадров (размер 1280 × 720 пикселей) в секунду и наличия в обучающей выборке 50 гипотез, то требуемая производительность вычислителя типа «Эльбрус» должна составлять не менее 50 Гфлопс. Это позволило обосновать применение микропроцессоров «Эльбрус-4С» для бортовой вычислительной системы в мобильных робототехнических комплексах.

Требования к пропускной способности каналов передачи данных между датчиками системы технического зрения зависят от особенностей

предметной области РТК. В табл. 2 приведены оценки требований к пропускной способности для различных типов датчиков. Выполнение этих требований закладывается в конструкцию бортовой вычислительной системы.

Заключение

В статье рассмотрены подходы к моделированию с целью обоснования облика и испытаний сложных систем. Рассмотрен процесс выбора и обоснования вычислительных средств для системы управления на этапе предпроектного моделирования. Показана возможность построения систем управления наземных роботов на отечественных вычислительных комплексах. Предложен метод оценки функции влияния отдельных компонентов, реализуемых специализированной ЭВМ, на результаты работы системы управления.

Таблица 1

Микропроцессоры ряда «Эльбрус», применение которых возможно в мобильных робототехнических комплексах

Наименование микропроцессора	Производительность, Гфлопс	Тепловыделение, Вт	Количество ядер	Технология изготовления, нм	Начало производства, год
«Эльбрус-S»	8	20	1	90	2010
«Эльбрус-2С+»	16(+12)	25	2 + 4DSP	90	2011
«МЦСТ R1000»	16	15	4	90	2011
«Эльбрус-4С»	50	55	4	65	2013
«Эльбрус-2СМ»	12	20	2	90 (микрон)	2014
«Эльбрус-8С»	250	80	8	28	2015
«Эльбрус-1С+»	24	15	1 + 1GPU	40	2015
«Эльбрус-4СМ»	50	–	4	65 (микрон)	2017
«Эльбрус-16С»	От 500 до 1000 включ.	–	16	16	2018
«Эльбрус-32С»	4000	–	32	10	2020
«Эльбрус-8СМ»	250	–	8	32 (микрон)	2020

Таблица 2

Требования пропускной способности каналов передачи данных

Тип данных	Источник	Частота передачи, Гц	Требуемая скорость передачи, Мбит/с	Примечание
Сжатое изображение со стереокамер	Камеры	10	200	Разрешение 640 × 480
3D-облако точек со стереокамер	Вычислитель на шасси	10	20	Около 20 000 точек
3D-облако точек от 3D-лидара	3D-лидар	10	11	32 × 360 = 11520 точек
Сжатое изображение с камеры опорной проходимости	Камера опорной проходимости	10	100	Разрешение 640 × 480
Данные 2D-дальномеров	2D-дальномеры	20	4	1000 точек у каждого дальномера 20 Гц
Данные остальных систем, вспомогательных команд и команд управления	Вычислитель на базе «Эльбрус»	10	10	–

На примере системы управления наземным робототехническим комплексом показана возможность применения методов единой программно-аппаратной платформы «Эльбрус» как на этапе предпроектного анализа, так и при проведении соответствующих ОКР, что позволяет решать вопросы импортозамещения и информационной безопасности.

Список литературы:

1. Шаракшанэ А.С., Железнов И.Г. Испытания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1974.
2. Прохоров Н.Л. и др. Управляющие вычислительные комплексы для промышленной автоматизации. Уч. пособие / Под ред. Н.Л. Прохорова, В.В. Сюзева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
3. Парамонов Н.Б., Ржевский Д.А., Перекатов В.И. Доверенная программно-аппаратная среда «Эльбрус» бортовых вычислительных средств робототехнических комплексов // Вопросы радиоэлектроники. 2015. Сер. ЭВТ. № 3. С. 159-168.

4. Парамонов Н.Б., Токарев Д.А. Предпроектное моделирование систем управления // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. Т. II. № 4. С. 165-170.

Николай Борисович Парамонов,

д-р техн. наук, профессор,

гл. научный сотрудник,

Геннадий Алексеевич Егоров,

д-р техн. наук, ст. научный сотрудник,

Сергей Владимирович Семенихин,

д-р техн. наук, профессор,

начальник отделения,

ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»,

г. Москва,

e-mail: paramonov_n_b@rambler.ru

Уважаемые коллеги!

Редакция журнала «Приборы» предлагает Вам опубликовать материалы о Вашей организации в разделе «Портрет предприятия».

Данный раздел включает в себя «визитную карточку» – справку об организации – и далее:

• **для разработчиков приборов и средств автоматизации:**

☞ основные виды деятельности, подробный перечень (каталог) Вашей продукции с техническими характеристиками, схемами и фотографиями;

• **для фирм-разработчиков АСУ:**

☞ конкретные разработки аппаратных средств, программного обеспечения и их использование;

☞ работы, связанные с внедрением АСУ, типы внедряемых систем;

☞ вопросы обеспечения проектирования с описанием конкретных проектов;

☞ опыт эксплуатации систем;

☞ другие виды деятельности (монтажно-наладочные работы, обеспечение коммуникациями, дистрибуция).

Материал может быть напечатан в нескольких номерах журнала с продолжением. Максимальный объем публикации в одном номере — 20 страниц.

Мы приглашаем Вас также присылать отдельные статьи о конкретных разработках в другие разделы нашего журнала: «Приборы и средства автоматизации», «Системы автоматизации», «Теория и конструирование», «Технология, оборудование и новые материалы».

Срок публикации статей — от одного до трех месяцев. Публикация статей осуществляется бесплатно.

Все материалы могут сопровождаться цветной рекламой как внутри журнального текста, так и на любой из сторон обложки, кроме первой.